

DOI: 10.5846/stxb202107272042

杨婉清, 杨鹏, 孙晓, 韩宝龙. 北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响. 生态学报, 2022, 42(16): 6487-6498.

Yang W Q, Yang P, Sun X, Han B L. Changes of landscape pattern and its impacts on multiple ecosystem services in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6487-6498.

北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响

杨婉清¹, 杨 鹏¹, 孙 晓^{1,2,*}, 韩宝龙²

1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业农村部农业遥感重点实验室, 北京 100081

2 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 景观格局是人与自然共同作用的结果, 深刻影响着区域的生态系统服务及可持续发展。以高度城市化地区——北京市为案例, 选取了粮食生产、水质净化、空气净化、气体调节、生境质量以及休闲娱乐 6 项重要生态系统服务, 采用 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)、ROS (Recreation Opportunity Spectrum) 等模型定量评估了 1980—2018 年生态系统服务时空分布。通过对北京市景观组成与景观配置指数进行定量分析, 进一步探索了景观格局演变对生态系统服务的影响。结果表明: (1) 北京市 1980—2018 年建设用地扩张了 120%, 建设用地扩张是耕地面积减少的主要原因。景观格局总体上趋于破碎化, 斑块形状复杂化, 斑块异质性增加; (2) 时间上, 北京市 1980—2018 年粮食生产、水质净化、气体调节、生境质量、休闲娱乐 5 项生态系统服务均呈现下降趋势; 空间上, 粮食生产呈现东南部较高, 西北部较低的分布特征, 其余生态系统服务均呈现西北部较高, 东南部较低, 市中心最低的分布特征; (3) 景观水平上, 林地、建设用地等景观组成变化对生态系统服务影响最为显著。破碎化指数、多样性指数等景观配置指数对生态系统服务影响最为显著; 类型水平上, 平均斑块面积、斑块聚集度对生态系统服务影响相对最为显著。总体来讲, 通过分析景观格局演变如何影响生态系统服务, 为如何通过设计和优化景观格局来提升生态系统服务提供了定量依据, 从而为促进区域的景观可持续规划提供理论依据和案例参考。

关键词: 生态系统服务; 土地利用; 景观格局指数; 影响分析

Changes of landscape pattern and its impacts on multiple ecosystem services in Beijing

YANG Wanqing¹, YANG Peng¹, SUN Xiao^{1,2,*}, HAN Baolong²

1 Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Landscape pattern is the result of the interaction between human and nature. During the urbanization process, the landscape pattern had changed significantly, which affected the ecological process and thus threatened ecosystem services. The assessment of the impacts of landscape pattern on ecosystem services is crucial for regional sustainable development. Taking Beijing as a case study, we quantified the spatiotemporal changes of six selected ecosystem services, including food production, water purification, air quality regulation, carbon storage, habitat quality, and recreation opportunity from 1980 to 2018 by using the InVEST and Recreation Opportunity Spectrum (ROS) models. In addition, we analyzed changes of landscape patterns in Beijing, and explored the impacts of landscape patterns on ecosystem services. The results showed that: 1) the landscape pattern in Beijing experienced dramatically changes from 1980 to 2018. The build-up land expanded by 120%, which mainly resulted in the reduction of cropland. The overall landscape pattern tended to be fragmented, the

基金项目: 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目 (SKLURE2020-2-1); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41901227)

收稿日期: 2021-07-27; **网络出版日期:** 2022-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunxiao@caas.cn

patch shape index became more complicated and the heterogeneity of the patches also increased. 2) Food production, water purification, carbon storage, habitat quality, and recreation opportunity showed a decreasing trend from 1980 to 2018. Spatially, food production was higher in the southeast and lower in the northwest. For the other ecosystem services, they were higher in the northwest, lower in the southeast, and the lowest in the central downtown area. During the past 38 years, the food production decreased the most in the central region of Beijing, while the air quality regulation, carbon storage, habitat quality, and recreational opportunity decreased the most in the eastern and southern regions. 3) At the landscape level, changes in land-use types, such as woodland, grassland, and build-up land had the most significant impacts on ecosystem services. Landscape metrics, such as the fragmentation index and diversity index influenced ecosystem services more obviously. At the class level, the mean patch area and the patch aggregation index had the most significant impacts on ecosystem services. Among them, the mean patch area and aggregation index of woodland showed positive effects on air quality and carbon storage. However, the aggregation index of built-up land showed a negative effect on habitat quality. In general, this study focused on analyzing the impacts of landscape pattern changes on ecosystem services, which can help decision makers to improve the ecosystem services by optimizing landscape patterns. The results of this study also can provide theoretical and practical basis for promoting regional landscape sustainable planning.

Key Words: ecosystem services; land use; landscape pattern metrics; impact analysis

生态系统服务是指生态系统为人类提供的福祉,是人类生存与发展的基础^[1-2],土地利用变化可以显著改变生态系统的模式和过程,导致生态系统服务的变化^[3]。景观格局是由不同的土地利用类型在空间上呈现的分布与组合形式,是各种生态过程在不同尺度上作用的结果^[4-5]。随着经济、人口的不断增长,人类对于生态系统的利用和消耗持续增加,带来了严峻的生态环境问题^[6],导致生态系统服务不断退化^[1]。从景观角度考虑人与生态环境之间的相互作用,能够为区域生态环境保护提供有力保障,切实有效地促进区域可持续性发展^[7]。尤其是在人类活动与自然生态环境矛盾突出的快速城市化区域中,明确景观格局与生态服务之间的关系,可以为深入研究生态系统服务时空演变对景观格局的响应机制提供理论基础,从而在景观格局优化角度对生态系统服务的提升提供新的方法途径。

景观格局与生态服务之间的耦合关系研究是生态系统服务管理以及景观可持续规划等跨学科领域的热点问题^[8]。目前,大部分学者重点关注土地利用如何对生态系统服务产生影响,分析自然生态系统服务价值动态变化与土地利用之间的关系,例如:Terefe 等分析了埃塞俄比亚森林地区的土地利用变化和生态系统服务价值变化,发现林地面积占比的减小,会使得该地区水量供应等重要生态系统服务功能丧失^[9];张发等探究了博斯腾湖流域土地利用变化与生态系统服务价值时空演变,发现水域、草甸和草原的面积变化是流域生态系统服务价值变化的主要影响因素^[10]。也有学者关注景观格局指数与生态系统服务价值之间的关系,例如:Ayiner 等研究了艾比湖流域生态系统服务价值与景观格局变化之间的相关性,发现景观多样性指数与生态系统服务价值有显著的正相关关系^[11],Hou 等研究了西安市生态系统服务价值与景观格局变化之间的关系,发现聚集度指数对生态系统服务价值有正向影响^[12]。其中,生态系统服务价值是通过针对不同土地利用类型进行赋值的价值当量法来计算,赋值主要依据专家知识经验,具有较大的不确定性^[13]。因此,为了更加客观地分析景观格局与生态系统服务之间的定量关系,本研究旨在:(1)从多时空尺度,量化北京市景观组成、景观配置指数以及多种生态系统服务;(2)从景观和类型两个水平,探究多种景观格局指数如何影响生态系统服务。

2016 年公布的《新城市议程》中提到,到本世纪中叶,世界城市人口预计将增加一倍,随之而来的城市化问题对于自然环境的可持续性带来巨大的挑战^[14]。尤其对于高度城市化地区,北京市 1980—2018 年常住人口由 904 万人增长到 2154 万人,地区经济总值由 139 亿元增长到 33106 亿元^[15]。在经济和人口不断发展的

过程中,北京市建设用地不断扩张,景观格局发生剧烈变化^[16],并且引发了一系列的生态环境问题^[17],生态系统服务也随之受到威胁^[18],研究北京市景观格局对生态系统服务的影响对于区域景观生态的可持续发展尤为重要。基于此,本研究旨在:(1)定量分析北京市 1980—2018 年景观格局时空演变特征;(2)定量评估北京市 1980—2018 年生态系统服务时空演变规律;(3)探究北京市景观组成与景观配置指数对多种生态系统服务的影响。

1 研究区概况

北京市位于华北平原北部(39.4°—41.6°N、115.7°—117.4°E),下辖 16 个区县,面积为 16410km²,是全国的政治、经济和文化中心。整体地势西北高、东南低,其中,西、北和东北三面环山,山区面积约占总面积 62%,东南部相对平坦^[19]。平均海拔 43.5m,年均降水 506mm^[20],属于暖温带半湿润半干旱季风气候。2018 年全市常住人口 2154 万人,地区生产总值 33106 亿元,城镇化率为 86%^[15]。作为中国特大城市之一,北京市 1980—2018 年经历了快速的城市化过程,也伴随着巨大的景观格局变化和生态系统服务退化^[21]。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源

本文的数据来源包括:(1)遥感影像数据:分辨率为 30m 的 Landsat-MSS 遥感影像(1980 年)、Landsat-TM 遥感影像(1990 年、2000 年、2010 年)、Landsat-OLI 遥感影像(2018 年)5 期影像数据,来源于美国地质勘查局网站(<https://www.usgs.gov/>)。(2)土地利用数据:分辨率为 30m 北京市 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2018 年土地利用遥感监测数据,来源于中国科学资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。(3)统计数据:1980、1990、2000、2010、2018 年北京市各地区主粮作物单产、面积数据,来源于北京市统计年鉴^[15],中国农业年鉴^[22]。(4)DEM 数据:分辨率为 30m 的 ASTER GDEM 数据,数据来源于美国国家航天航空局网站(<https://www.nasa.gov/>)。

2.2 景观格局分析

2.2.1 景观类型变化

基于土地利用数据,将北京市分为耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地 6 类,利用经过镶嵌、裁剪,几何校正等处理后的遥感影像数据,采用监督分类方法对土地利用数据进行校正,得到 Kappa 系数大于 80% 且空间分辨率为 30m 的土地利用分布图,分析北京市 1980—2018 年不同土地利用动态变化趋势。空间叠加 1980、2018 年北京市土地利用分布图,并利用转移矩阵表示景观类型转移情况。

2.2.2 景观指数变化

景观指数是指能够高度浓缩景观格局信息,有效反映其结构组成和空间配置等方面特征的简单定量指标,分为 3 个层次:斑块、类型和景观水平^[23]。各景观指数本身有一定关联,许多指数之间存在冗余,所以选取典型指数来表征景观格局^[24]。本研究通过阅读相关文献^[16,23],从类型和景观水平 2 个尺度共选取 8 个指数:斑块密度、平均斑块面积、边缘密度、聚集度、景观形状指数、Shannon 多样性、连通性、蔓延度(表 1),利用 Fragstats 4.2.1 软件计算选取的景观指数。

2.3 生态系统服务评估

2.3.1 粮食供给

以北京市 1980—2018 年农田产量数据来量化北京市粮食供给服务,统计 1980、1990、2000、2010、2018 年北京市各地区主粮作物单产、面积数据,通过 SPAM(Spatial Production Allocation Model)模型对多源数据格式进行一致化处理,基于模拟的作物空间概率分布以及作物空间竞争优化过程,将行政单元统计的作物产量值分配至像元尺度^[25]。

表 1 选取的北京市典型景观格局指数
Table 1 The selected typical landscape metrics of Beijing

景观指数 Landscape metrics	水平 Level	公式 Formula	指标描述 The descriptions of metrics
斑块密度 (PD)	类型/景观	$PD = N/A$	式中, N : 景观中斑块总数, A : 景观总面积。PD 反映景观的破碎程度。
平均斑块面积 (MPS)	类型	$MPS = \frac{A}{N} \times 10^{-6}$	式中, N : 景观中斑块总数, A : 景观总面积。MPS 反映整个景观的异质性。
边缘密度 (ED)	类型	$ED = \frac{E}{A} \times 10^{-6}$	式中, E : 景观中斑块边界总长度, A : 景观总面积。ED 反映景观要素的动态特征。
聚集度 (AI)	类型	$AI = \frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}}$	式中, g_{ii} : 景观类型的相似邻接斑块数量, AI 反映同一类型斑块的聚集程度。
景观形状指数 (LSI)	景观	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$	式中, E : 景观中斑块边界总长度, A : 景观总面积。LSI 越大, 斑块的形状越复杂。
Shannon 多样性 (SHDI)	景观	$SHDI = - \sum_{i=1}^m P_i \ln(P_i)$	式中, P_i : 景观斑块类型 i 在景观中出现的概率, m : 斑块类型总数。SHDI 反映景观中各斑块类型非均衡分布状况。
连通性 (CONNECT)	景观	$CONNECT = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ijk}}{\sum_{i=1}^m (n_i(n_i - 1)/2)}$	式中, c_{ijk} : 给定距离内, i, j, k 斑块类型是否连接, n_i : 景观内 i 类型斑块数。CONNECT 反映景观元素的空间分布。
蔓延度 (CONTAG)	景观	$CONTAG = [1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{P_{ij} \ln(P_{ij})}{2 \ln(m)}]$	式中, P_{ij} : 随机选择的两个相邻栅格属于类型 i 与 j 的概率, m : 斑块类型的总数。CONTAG 反映景观中不同斑块类型的延展趋势或团聚程度。

PD: 斑块密度 Patches density; MPS: 平均斑块面积 Mean patch area; ED: 边缘密度 Edge density; AI: 聚集度 Aggregation index; LSI: 景观形状指数 Landscape shape index; SHDI: Shannon 多样性指数 Shannon diversity index; CONNECT: 连通性 Connectance index; CONTAG: 蔓延度 Contagion index

2.3.2 水质净化

水质净化服务功能主要考虑植被对水体中氮元素的净化能力, 使用 InVEST 模型中的水质净化模块进行评估。本文选择单位面积生态系统总氮输出的多少来表示水质净化服务的大小, 即: 单位面积生态系统总氮输出越少, 水质净化服务越高。该模块计算公式如下:

$$\begin{aligned} WP_x &= 1/ALV_x \\ ALV_x &= HSS_x \times pol_x \\ HSS_x &= \frac{\lambda_x}{\lambda_w} \\ \lambda_x &= \log(\sum_u Y_u) \end{aligned}$$

式中, WP_x 是指栅格单元 x 的水质净化服务功能, ALV_x 是栅格单元 x 调节的负荷值, pol_x 是栅格单元 x 的输出系数, HSS_x 是水文敏感分值, λ_x 是栅格单元 x 的径流系数, λ_w 是集水区的平均径流指数, $\sum_u Y_u$ 是集水区所有栅格产水量总和。模型的输入参数参考 Gao、Zheng、李屹峰等的研究^[26—28]。

2.3.3 空气净化

通过各类生态系统(例如森林、草地等)对总悬浮颗粒物 TSP、可吸入颗粒物 PM_{10} 、二氧化硫 SO_2 以及氮氧化物 NO_x 等颗粒截留吸收量来表征空气净化生态系统服务。

$$S_i(TSP, PM_{10}, SO_2, NO_x) = A_i \times P_i$$

式中, $S_i(TSP, PM_{10}, SO_2, NO_x)$ 表示植被种类 i 对颗粒物的截留吸收量; A_i 表示植被种类 i 的面积; P_i 表示植物种类 i 单位面积对颗粒物的截留吸收量, 各景观类型的颗粒截留吸收量参数参考 Wu、Landuyt 等的

研究^[29—30]。

2.3.4 气体调节

生态系统通过增减大气中的二氧化碳等温室气体调节气候,本研究使用碳储量来表征气体调节生态系统服务。对每一种景观类型,采用 InVEST 模型对四种基本碳库进行估算,把各类碳库的估测值用于土地利用空间分布图上,从而生成整个景观的碳储量分布图,计算公式如下:

$$S_c = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$$

式中, S_c 为总的碳储量; C_{above} 为地上部分碳储量; C_{below} 为地下部分碳储量; C_{soil} 为土壤部分碳储量; C_{dead} 为死亡有机质的碳储量。各景观类型的生物质碳储量参考 Guo、He 等的研究^[31—32]。

2.3.5 生境质量

栖息地的质量取决于来自威胁的外部压力强度,以及栖息地类型对每种威胁的相对敏感性,采用 InVEST 模型中的生境质量模块进行评估,结果用生境质量指数来表示,计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left\{ 1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right\}$$

式中, Q_{xj} 为土地利用类型为 j 时栅格 x 的生境质量, H_j 表示土地利用类型 j 的生境类型评估分数, D_{xj} 则表示土地覆被类型 j 上栅格单元 x 的生境胁迫水平, z 值表示所用到的尺度常量值,通常是 2.5, k 值是使用的半饱和常数。根据 Wu 等人的研究和当地调查确定本模块中的参数^[33]。

2.3.6 休闲娱乐

通过 Recreation Opportunity Spectrum (ROS) 模型进行评估生态系统中的水体吸引力来表征休闲娱乐服务^[34],结果由娱乐机会指数呈现,计算公式如下:

$$f(d) = \frac{1 + K}{K + e^{\alpha \times d}}$$

式中, d 表示距河岸的距离, α 和 K 分别表示函数的大小和形状参数。

2.4 相关性分析

采用偏相关系数表示 1980—2018 年北京市生态系统服务与景观格局之间的相关性,系数的大小表示两者关系的强弱程度,系数为正表示两者呈正相关,系数为负表示两者呈负相关。本研究利用 R 3.6.2 实现生态系统服务与景观类型面积以及景观格局指数之间的偏相关分析和显著性检验,并进行可视化。

3 结果与分析

3.1 景观格局变化分析

3.1.1 土地利用变化

根据北京市 1980—2018 年不同土地利用变化情况(图 1),北京市景观类型以林地为主,主要分布在北京市西部和北部的山区,而东南部的平原地区以耕地与建设用地为主,建设用地扩张地区主要位于北京市东南部;北京市 1980—2018 年耕地面积大幅减少,建设用地面积大幅增加,其中,耕地面积比例由 37% 下降到 23%,共减少 2155km²,建设用地面积由 8% 增加到 18%,面积增加 1598km²。此外,草地、水体以及未利用地的面积变化并不明显。

忽略面积比例较小的未利用地,由北京市 1980—2018 年土地利用转移情况表(表 2),可以看出:1980—2018 年,北京市土地利用转移面积达 3803km²,占总面积的 23%,表现出耕地的大量转出和建设用地、林地大量转入的特征。其中,耕地主要转为建设用地,转出为建设用地的面积占耕地总转出面积的 64%;建设用地主要由耕地转入,占建设用地总转入面积的 87%;林地主要由耕地转入,占林地总转入面积的 62%。其他土地利用类型之间有不同程度的转换,但转换率相对较低。

3.1.2 景观指数变化

由北京市 1980—2018 年景观水平指数(表 3)发现,北京市 1980—2018 年整体景观更加破碎化。斑块密

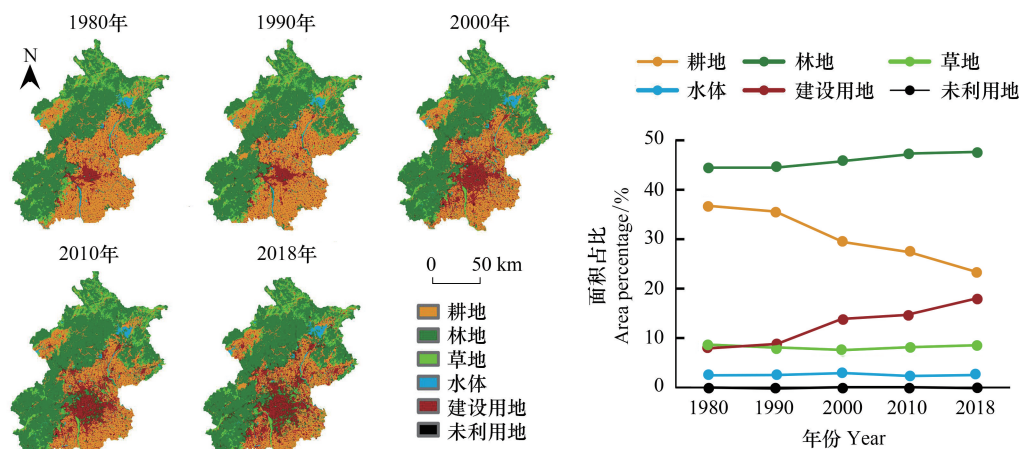


图1 北京市 1980—2018 年土地利用变化

Fig.1 Changes of land use in Beijing City, 1980—2018

度不断增加,斑块数目增多;景观形状指数不断增加,景观形状趋于复杂化;蔓延度指数先增后减,景观类型的聚集程度降低;连通度指数不断减小,各景观类型之间连通性降低,斑块空间分布趋于零散;Shannon 多样性指数先增后减,总体减少,各景观类型面积分布越来越不均匀。

表 2 北京市 1980—2018 年土地利用转移情况表/km²

Table 2 Table of transfer in different land use types in Beijing City, 1980—2018

1980 年	2018 年				
	耕地 Cropland	林地 Woodland	草地 Grassland	水体 Water bodies	建设用地 Built-up land
耕地 Cropland	3441.55	576.14	244.04	107.19	1632.36
林地 Woodland	163.65	6861.00	87.66	28.36	138.05
草地 Grassland	78.88	197.76	984.79	33.22	61.80
水体 Water bodies	58.70	36.84	44.83	237.82	39.02
建设用地 Built-up land	99.90	115.37	49.17	10.37	1034.54

表 3 北京市 1980—2018 年景观水平指数

Table 3 Landscape metrics for landscape levels, Beijing City, 1980—2018

年份 Year	PD/个	LSI	CONTAG	CONNECT	SHDI
1980	0.65	64.21	1.06	61.29	0.08
1990	0.79	67.74	1.06	60.77	0.08
2000	1.24	84.26	1.07	58.17	0.06
2010	1.59	87.59	1.06	58.10	0.06
2018	2.28	94.86	1.06	57.31	0.06

由北京市 1980—2018 年类型水平景观指数(表 4)发现,耕地在 1980—2000 年斑块数目增多,平均斑块面积减小,斑块边缘密度增大,边界形状复杂化,斑块聚集度降低,整体呈破碎化发展。2000—2018 年,耕地呈现不同的变化规律,耕地斑块聚集性增强;林地、草地以及建设用地在 1980—2018 年斑块密度增加,平均斑块面积减小,边缘密度增加,斑块聚集度降低,呈现空间破碎化,其中建设用地斑块密度和边缘密度均大幅增加,平均斑块面积大幅减少,聚集度降低,斑块破碎化程度高。

表 4 北京市 1980—2018 年类型水平景观指数

Table 4 Landscape metrics for class levels, Beijing City, 1980—2018

景观类型 Landscape type	指数 Metrics	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2018 年
耕地 Cropland	PD/个	0.08	0.07	0.27	0.20	0.07
	MPS/hm ²	478.24	499.48	107.96	140.93	331.33
	ED/(m/hm ²)	12.65	13.20	16.63	15.34	12.63
	AI	97.42	97.23	95.78	95.82	95.97
林地 Woodland	PD/个	0.10	0.11	0.22	0.39	0.47
	MPS/hm ²	478.24	499.48	107.96	140.93	331.33
	ED/(m/hm ²)	9.75	10.10	11.63	13.50	16.26
	AI	98.32	98.26	98.07	97.82	97.41
草地 Grassland	PD/个	0.08	0.08	0.20	0.35	0.50
	MPS/hm ²	99.82	101.00	38.70	23.09	17.21
	ED/(m/hm ²)	7.28	7.53	7.46	8.33	10.03
	AI	93.42	93.23	92.62	92.34	91.26
水体 Water bodies	PD/个	0.09	0.22	0.13	0.13	0.10
	MPS/hm ²	27.41	11.49	23.13	18.03	24.55
	ED/(m/hm ²)	2.49	2.76	3.75	3.15	3.02
	AI	92.62	91.65	90.65	90.13	91.15
建设用地 Built-up land	PD/个	0.29	0.32	0.39	0.49	1.13
	MPS/hm ²	27.36	28.04	35.41	29.99	15.64
	ED/(m/hm ²)	6.54	7.29	11.56	12.73	15.90
	AI	93.94	93.89	93.82	93.49	93.32

3.2 生态系统服务变化

3.2.1 北京市 1980—2018 年生态系统服务时间变化

北京市 1980—2018 年生态系统服务变化(图 2)显示,除空气净化外的其他生态系统服务均呈现下降趋势。1980—2018 年北京市粮食生产、水质净化、气体调节和休闲娱乐服务先增后减,总体呈现下降趋势,生境

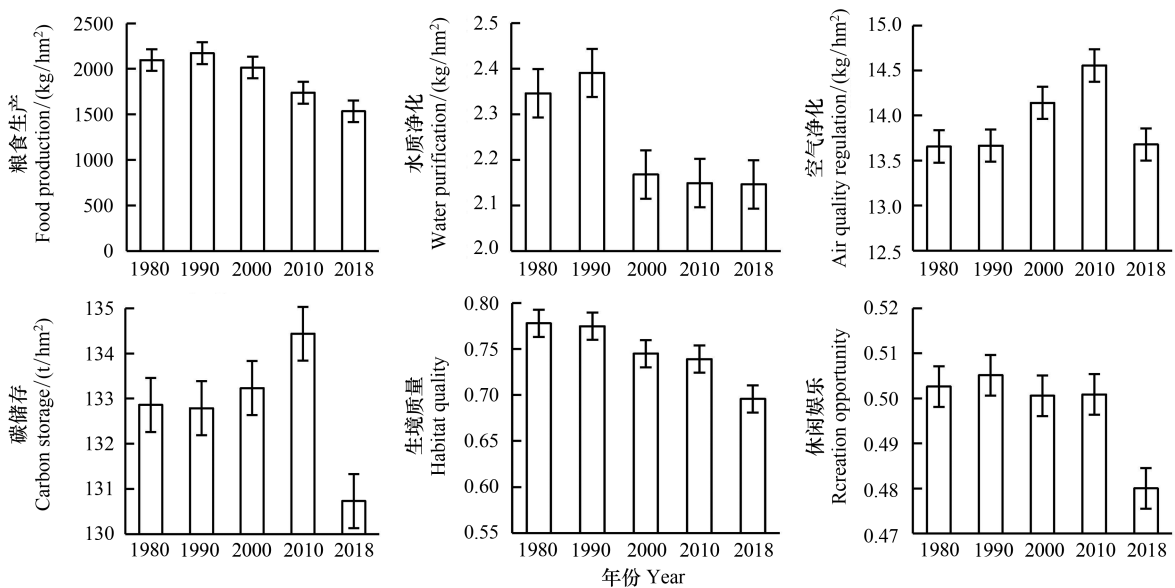


图 2 北京市 1980—2018 年生态系统服务变化

Fig.2 Changes of the ecosystem services in Beijing from 1980 to 2018

质量服务持续减少。其中,水质净化服务在 1990—2000 年大幅减少,空气净化、气体调节、休闲娱乐服务在 2010—2018 年显著降低。

3.2.2 北京市 1980—2018 年生态系统服务空间变化

根据北京市 1980—2018 年生态系统服务空间变化(图 3)显示,生态系统服务呈现显著的空间差异性。除粮食生产服务在东部、南部较高,西部、北部较低,其他服务均呈现西部、北部较高,东部、南部较低,中部最低的空间分布特征;1980—2018 年北京市中部地区粮食生产服务明显减少,空气净化、气体调节、生境质量、休闲娱乐服务在空间上呈现东部和南部地区减少的趋势,尤其是在建设用地扩张地区呈现显著减少的变化特征。

3.3 北京市生态系统服务对景观格局的响应

3.3.1 生态系统服务对景观水平的响应分析

由生态系统服务与土地利用类型面积的偏相关分析(图 4)可知,景观组成对生态系统服务有显著影响。耕地面积与粮食生产以及水质净化服务有正相关关系;林地、草地面积与空气净化、气体调节、生境质量、休闲娱乐服务均有正相关关系,其中空气净化、气体调节、休闲娱乐等服务对林地的响应最为强烈;建设用地面积与所有的生态系统服务均有负相关关系,其中生境质量服务对建设用地的响应最为强烈。

由生态系统服务与景观水平指数的偏相关分析(图 4)可知,区域内景观破碎化程度以及多样性对生态系统服务有显著影响。斑块密度与区域内所有生态系统服务均有负相关关系,斑块形状指数与区域内所有生态系统服务均有正相关关系;景观多样性与除粮食生产服务外的其他生态系统服务有正相关关系。其中,斑块密度与生境质量服务有显著的负相关关系,景观多样性与生境质量服务有显著的正相关关系。

3.3.2 生态系统服务对类型水平的响应分析

由生态系统服务与景观类型指数的偏相关分析(图 5)可知,各景观类型的景观指数对生态系统服务的影响具有差异性。耕地的平均斑块面积与边缘密度与粮食生产服务有显著的正相关关系;林地的平均斑块面积和空间聚集度与空气净化、气体调节、生境质量、休闲娱乐服务有显著的正相关关系;建设用地边界密度和空间聚集度与空气净化、气体调节、生境质量、休闲娱乐服务有显著的负相关关系。

4 讨论

1980—2018 年,北京市中心城区建设面积不断向外扩张,斑块呈现破碎化趋势,其中受影响最大的是耕地,耕地斑块变得破碎且分散^[35-36]。同时,城市化发展过程对北京市的景观结构配置造成显著影响,尤其是 2000 年之后,受到人类活动的剧烈影响,北京中心城区、东南部地区建设用地组分优势度明显,导致北京市整体景观破碎化增加,多样性降低^[16]。

北京市在过去 38 年间,生态系统服务严重下降,这主要是由于人类频繁的社会经济活动造成了自然生态系统的严重破坏^[37]。尤其是东南部地区,建设用地占比不断增大,因此生态系统服务明显下降。西部和北部地区,山地面积占比较大,受人类活动干扰较少,植被生物量较高^[38],提供的调节和文化生态系统服务相对更高。

土地利用变化是北京市生态系统服务变化的主要原因,当林地等自然生态系统向建设用地等人工生态系统发生转变时,会带来生态系统服务与生物多样性的减少^[18,39]。林地面积的增加有助于提高生物物质以及木材生产的碳储存量,并适度促进土壤中碳的储存^[40],植被叶片的微观结构与去除空气中大小颗粒能力密切相关^[41],因此,增加林地面积对空气净化、气体调节服务有显著的正向效应;随着经济和人口的增长,建设用地不断扩张,自然生境遭到破坏,导致生物多样性降低,区域生境质量变差^[42]。

不同的景观配置会对北京市生态系统服务有显著影响。增加景观多样化与景观类型均衡分布,有助于提高生态系统的稳定性^[11],而破碎的景观会阻碍区域间的能量流动,改变物质和营养循环过程,对生态系统服务有显著的负面影响^[43]。耕地斑块破碎化不利于农田的规模化管理和农业资产的合理配置,会严重影响粮

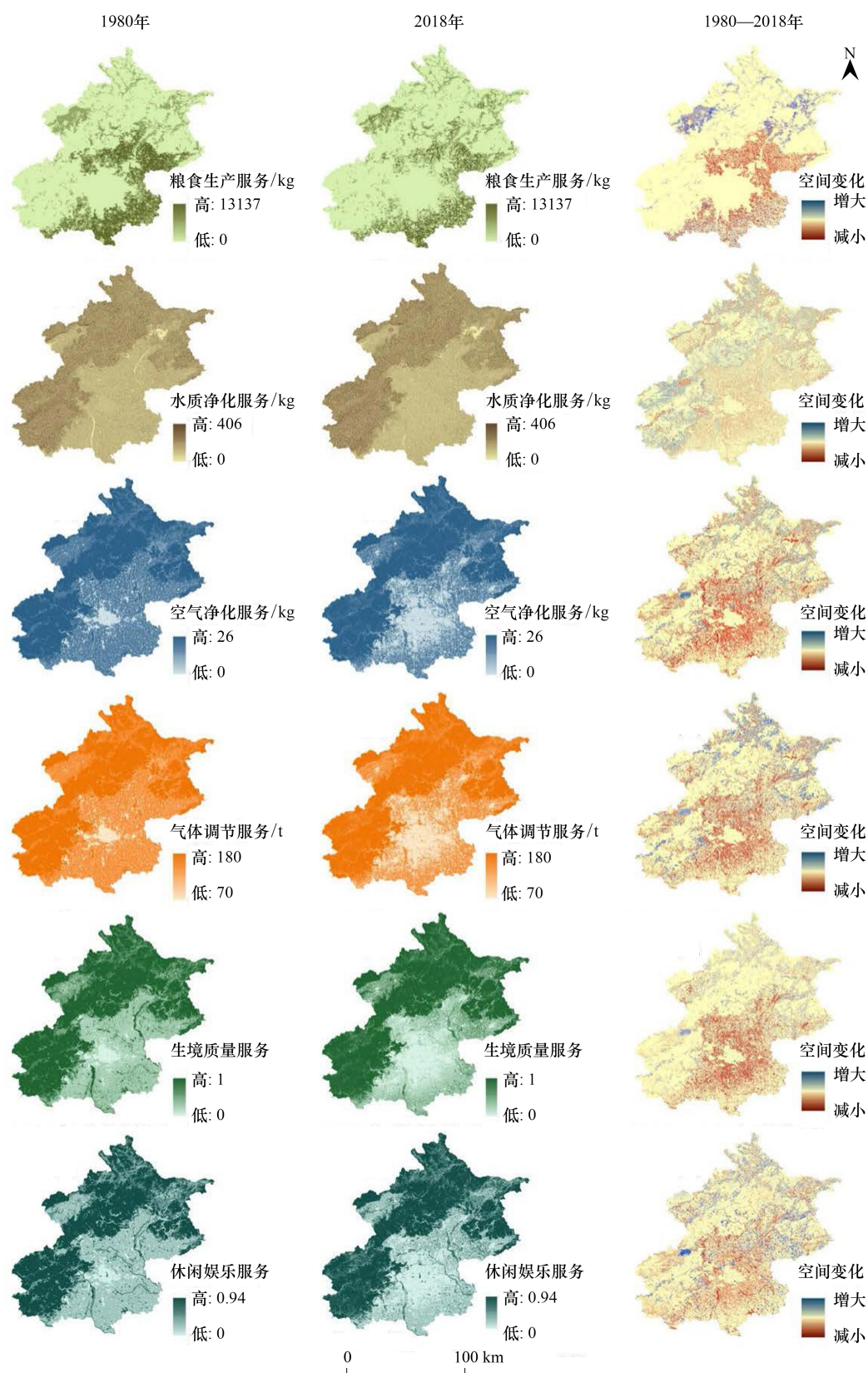


图3 北京市1980—2018年生态系统服务空间变化

Fig.3 The spatial changes of the ecosystem services in Beijing from 1980 to 2018

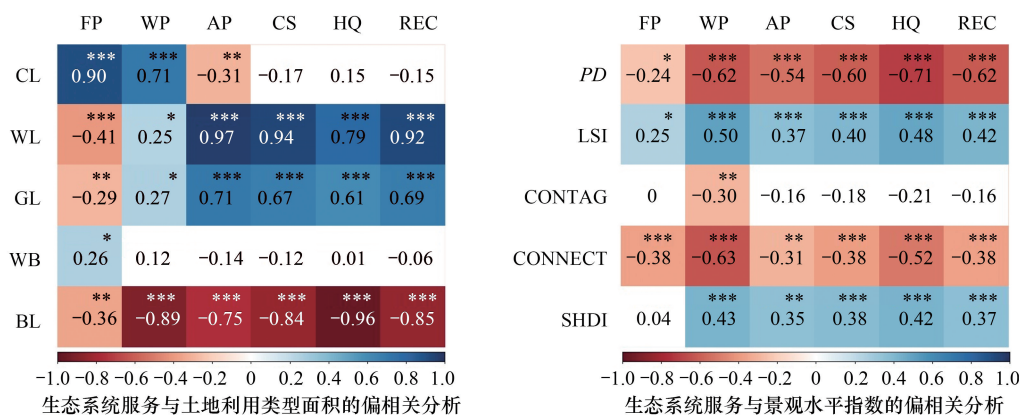


图4 生态系统服务分别与土地利用类型面积以及景观水平指数的偏相关分析

Fig.4 Partial correlation analysis between ecosystem services and land use types and partial correlation analysis between ecosystem services and landscape metrics for landscape levels

CL:耕地 Cropland; WL:林地 Woodland; GL:草地 Grassland; WB:水体 Water bodies; BL:建设用地 Built-up land; FP:粮食生产 Food production; WP:水质净化 Water purification; AP:空气净化 Air quality regulation; CS:气体调节 Carbon storage; HQ:生境质量 Habitat quality; REC:休闲娱乐 Recreation opportunity; PD:斑块密度 Patches density; LSI:景观形状指数 Landscape shape index; CONTAG:蔓延度 Contagion index; CONNECT:连通性 Connectance index; SHDI:Shannon 多样性指数 Shannon diversity index; ***, $P < 0.001$; **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$

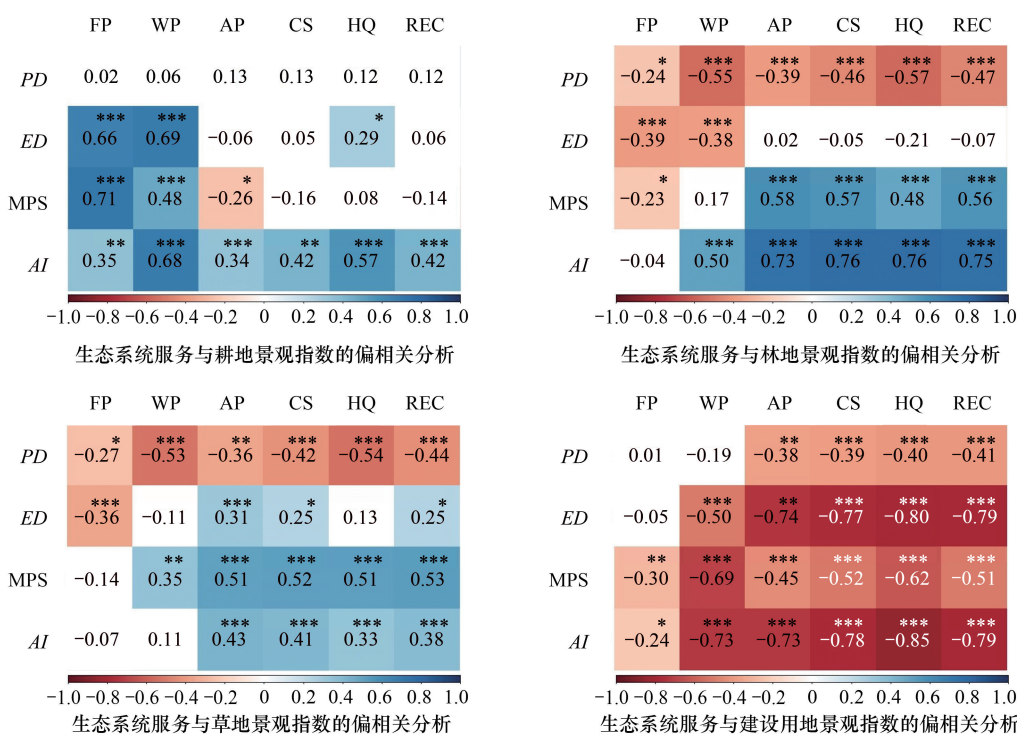


图5 生态系统服务与景观类型指数的偏相关分析

Fig.5 Partial correlation analysis between ecosystem services and landscape metrics for class levels

ED:边缘密度 Edge density; MPS:平均斑块面积 Mean patch area; AI:聚集度 Aggregation index; ***, $P < 0.001$; **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$

食生产效率^[44-45];林地斑块面积越大,空间分布越聚集,生态系统提供的空气净化、气体调节、生境质量服务则越多^[46];不规则建设用地斑块数量越多,空间分布越聚集,造成自然生境斑块更加破碎,连通性不断降低,生境质量不断下降^[47]。

本文从景观组成与景观配置两个方面,分析了北京市景观格局对多种生态系统服务的影响;未来的研究应基于具体的生态过程及其机制,通过改变景观格局,引起生态过程变化,从而提升区域生态系统服务;针对特定区域进行景观优化,在保证生态系统稳定性的同时为人类提供更多的福祉,促进生态系统的可持续发展^[48-49]。

5 结论

(1)1980—2018年,北京市景观格局发生剧烈变化,建设用地面积显著增加,耕地面积显著减少;景观整体呈现破碎化趋势,斑块异质性增加。多数生态系统服务呈下降趋势,其中东南部地区的生态系统服务减少最为明显。

(2)景观水平上,增加林地、草地面积对空气净化、气体调节服务有显著的正向效应,增加建设用地面积对生境质量服务有显著的负向效应;降低景观破碎化程度,增加景观多样性对生态系统服务有正向效应;类型水平上,增加耕地的平均斑块面积对粮食生产服务有显著的正向效应,增加林地的聚集度对空气净化、气体调节服务有显著的正向效应,而增加建设用地的聚集度对生境质量服务有显著的负向效应。

(3)未来城市化发展过程中,针对生态系统服务的空间异质性特征,北京市不同区域应采取因地制宜的景观可持续规划策略。在顺义区、通州区等东部地区,应重点提升粮食生产服务,避免建设用地无序扩张与破碎化发展,优先保护耕地资源,增加平均斑块面积与空间聚集度;在市中心地区,应重点改善调节服务,减小建设用地的聚集度,提高林地、草地的等绿色基础设施的景观组成比例与空间聚集度;在怀柔区、密云区、门头沟区等西北部地区,应充分发挥其较高的调节和文化服务供给能力,避免林地、水体等自然景观面积比例的减少,从而促进区域的景观可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] MEA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington: Island Press, 2005.
- [2] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 徐卫华, 郑华, 张琰, 肖霖. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究. *生态学报*, 2013, 33(21): 6747-6761.
- [3] Wu X T, Wang S, Fu B J, Liu Y, Zhu Y. Land use optimization based on ecosystem service assessment: a case study in the Yanhe watershed. *Land Use Policy*, 2018, 72: 303-312.
- [4] Turner M G. Landscape ecology: what is the state of the science? *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2005, 36(1): 319-344.
- [5] Liu J, Liu X L, Wang Y, Li Y, Jiang Y X, Fu Y X, Wu J S. Landscape composition or configuration: which contributes more to catchment hydrological flows and variations?. *Landscape Ecology*, 2020, 35(7): 1531-1551.
- [6] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [7] Wu J G. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 2013, 28(6): 999-1023.
- [8] 孙然好, 孙龙, 苏旭坤, 陈利顶. 景观格局与生态过程的耦合研究: 传承与创新. *生态学报*, 2021, 41(1): 415-421.
- [9] Tolessa T, Senbeta F, Abebe T. Land use/land cover analysis and ecosystem services valuation in the central highlands of Ethiopia. *Forests, Trees and Livelihoods*, 2017, 26(2): 111-123.
- [10] 张发, 玉素甫江·如素力, 艾尔肯·图尔逊. 基于土地利用的博斯腾湖流域生态系统服务价值时空变化. *生态学报*, 2021, 41(13): 5254-5265.
- [11] Yushanjiang A Y N E, Zhang F, Yu H Y, Kung H T. Quantifying the spatial correlations between landscape pattern and ecosystem service value: a case study in Ebinur Lake Basin, Xinjiang, China. *Ecological Engineering*, 2018, 113: 94-104.
- [12] Hou L, Wu F Q, Xie X L. The spatial characteristics and relationships between landscape pattern and ecosystem service value along an urban-rural gradient in Xi'an city, China. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105720.
- [13] Chen W X, Zhao H B, Li J F, Zhu L J, Wang Z Y, Zeng J. Land use transitions and the associated impacts on ecosystem services in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt in China based on the geo-informatic Tupu method. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134690.
- [14] Zhang Q W, Su S L. Determinants of urban expansion and their relative importance: a comparative analysis of 30 major metropolises in China. *Habitat International*, 2016, 58: 89-107.
- [15] 北京市统计局. *北京统计年鉴-2019*. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [16] 阳文锐. 北京城市景观格局时空变化及驱动力. *生态学报*, 2015, 35(13): 4357-4366.

- [17] 北京市生态环境局. 2018 年北京市生态环境状况公报. (2019-05-09). <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/hjzl/index.html>.
- [18] Xie W X, Huang Q X, He C Y, Zhao X. Projecting the impacts of urban expansion on simultaneous losses of ecosystem services; a case study in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2018, 84: 183-193.
- [19] 北京市人民政府. [2021-07-27]. <http://www.beijing.gov.cn/renwen/.htm>.
- [20] 北京市水务局. 北京市水资源公报(2019 年度). (2020-09-18). http://swj.beijing.gov.cn/zwgk/szygb/202009/t20200918_2067751.html.
- [21] Peng J, Tian L, Liu Y X, Zhao M Y, Hu Y N, Wu J S. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: thresholds identification. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 706-714.
- [22] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴-2019. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [23] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007: 106-120.
- [24] Clément F, Ruiz J, Rodríguez M A, Blais D, Campeau S. Landscape diversity and forest edge density regulate stream water quality in agricultural catchments. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 627-639.
- [25] 刘珍环, 唐鹏钦, 范玲玲, 杨鹏, 吴文斌. 1980-2010 年东北地区种植结构时空变化特征. *中国农业科学*, 2016, 49(21): 4107-4119.
- [26] Guo Z D, Hu H F, Li P, Li N Y, Fang J Y. Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests from 1977 to 2008. *Science China Life Sciences*, 2013, 56(7): 661-671.
- [27] Zheng H, Li Y F, Robinson B E, Liu G, Ma D C, Wang F C, Lu F, Ouyang Z Y, Daily G C. Using ecosystem service trade-offs to inform water conservation policies and management practices. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(10): 527-532.
- [28] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. *生态学报*, 2013, 33(3): 726-736.
- [29] Wu J S, Wang Y, Qiu S J, Peng J. Using the modified i-Tree Eco model to quantify air pollution removal by urban vegetation. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 673-683.
- [30] Landuyt D, Broekx S, Engelen G, Uljee I, Van Der Meulen M, Goethals P L M. The importance of uncertainties in scenario analyses - a study on future ecosystem service delivery in Flanders. *Science of the Total Environment*, 2016, 553: 504-518.
- [31] He C Y, Zhang D, Huang Q X, Zhao Y Y. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 44-58.
- [32] Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, Mohammad A, Shen H H. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 757-765.
- [33] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 黄秀兰, 卢志强. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3457-3466.
- [34] Paracchini M L, Zulian G, Kopperoinen L, Maes J, Schägner J P, Termansen M, Zandersen M, Perez-Soba M, Scholefield P A, Bidoglio G. Mapping cultural ecosystem services: a framework to assess the potential for outdoor recreation across the EU. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 371-385.
- [35] Li H L, Peng J, Liu Y X, Hu Y N. Urbanization impact on landscape patterns in Beijing City, China: a spatial heterogeneity perspective. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 50-60.
- [36] 李伟, 贾宝全, 王成, 郝光发. 北京市景观格局动态变化. *东北林业大学学报*, 2010, 38(4): 37-41.
- [37] He C Y, Liu Z F, Tian J, Ma Q. Urban expansion dynamics and natural habitat loss in China: a multiscale landscape perspective. *Global Change Biology*, 2014, 20(9): 2886-2902.
- [38] Sun X, Yang P, Tao Y, Bian H Y. Improving ecosystem services supply provides insights for sustainable landscape planning: A case study in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 2022, 802: 149849.
- [39] Peng W F, Zhou J M, Fan S Y, Yang C J. Effects of the land use change on ecosystem service value in Chengdu, western China from 1978 to 2010. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2016, 44(2): 197-206.
- [40] Lawler J J, Lewis D J, Nelson E, Plantinga A J, Polasky S, Withey J C, Helmers D P, Martinuzzi S, Pennington D, Radeloff V C. Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(20): 7492-7497.
- [41] Zhao X X, Yan H W, Liu M, Kang L X, Yu J, Yang R. Relationship between PM_{2.5} adsorption and leaf surface morphology in ten urban tree species in Shenyang, China. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2019, 41(8): 1029-1039.
- [42] Zhang X R, Song W, Lang Y Q, Feng X M, Yuan Q Z, Wang J T. Land use changes in the coastal zone of China's Hebei Province and the corresponding impacts on habitat quality. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104957.
- [43] Holt A R, Mears M, Maltby L, Warren P. Understanding spatial patterns in the production of multiple urban ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2015, 16: 33-46.
- [44] 王嫚嫚, 刘颖, 蒯昊, 周晓时. 土地细碎化、耕地地力对粮食生产效率的影响——基于江汉平原 354 个水稻种植户的研究. *资源科学*, 2017, 39(8): 1488-1496.
- [45] Lee Y C, Huang S L. Spatial emergy analysis of agricultural landscape change: does fragmentation matter?. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 975-985.
- [46] 李慧杰, 牛香, 王兵, 赵志江. 生态系统服务功能与景观格局耦合协调度研究——以武陵山区退耕还林工程为例. *生态学报*, 2020, 40(13): 4316-4326.
- [47] Cheng F Y, Liu S L, Hou X Y, Zhang Y Q, Dong S K. Response of bioenergy landscape patterns and the provision of biodiversity ecosystem services associated with land-use changes in Jinghong County, Southwest China. *Landscape Ecology*, 2018, 33(5): 783-798.
- [48] 康世磊, 岳邦瑞. 基于格局与过程耦合机制的景观空间格局优化方法研究. *中国园林*, 2017, 33(3): 50-55.
- [49] Duarte G T, Santos P M, Cornelissen T G, Ribeiro M C, Paglia A P. The effects of landscape patterns on ecosystem services: meta-analyses of landscape services. *Landscape Ecology*, 2018, 33(8): 1247-1257.